Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Mineral Nutrient Uptake in Persian oak (*Quercus brantii* L.) Seedlings under Drought Stress

Mehri Khosravi[1] | **Mehdi Heydari**[2]✉ | **Hossein Ali Alikhani**[3] | **Asghar Mosleh Arani**[4] | **Narges Pordel**[5]

1. Department of Forest Sciences, Faculty of Agricultural, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: khosravimehri@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Forest Sciences, Faculty of Agricultural, Ilam University, Ilam, Iran
E-mail: m.heidari@ilam.ac.ir
3. Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: halikhan@ut.ac.ir
4. Department of Environmental Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran. E-mail: amosleh@yazd.ac.ir
5. Department of Forest Sciences, Faculty of Agricultural, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: nargess.po@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 30, 2025

Revised: \Feb. 14, 2026

Accepted: Apr. 23, 2026

Published online: April. 2026

Keywords:
Drought stress,
Iranian oak,
Mineral nutrients,
Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR),
Seedling quality

ABSTRACT

Drought stress is one of the most important abiotic stresses affecting plant growth, performance, and nutrient balance, leading to reduced seedling quality. This study aimed to evaluate the effect of seed inoculation with selected plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from native species on mineral nutrient uptake and Dickson Quality Index of Iranian oak (Quercus brantii L.) seedlings under water deficit stress and sustainable nursery management. The experiment was conducted at three levels of water stress (80%, 60%, and 40% field capacity) in a completely randomized design. The effects of PGPR inoculation on the uptake of P, Ca, Mg, Na, and K, K/Na ratio, seedling quality index, and physiological responses were assessed. Results showed that increasing water deficit stress reduced P, Ca, Mg, and Na concentrations and seedling quality, while K concentration and K/Na ratio increased. PGPR inoculation enhanced nutrient uptake, maintained ionic balance, improved seedling quality, and increased seedling resistance under drought conditions. In particular, Bacillus cereus and Bacillus licheniformis increased K, Ca, and Mg content and improved tissue turgor and photosynthesis. A significant positive correlation between seedling quality index and Ca highlighted the key role of this element in structural stability. These findings indicate that PGPR can serve as an effective biological strategy to improve nutrient efficiency, structural quality, and production of drought-resistant seedlings, supporting forest restoration and sustainable natural resource management.

Cite this article: Khosravi, M., Heidari, M., Alikhani, H. A., Mosleh Arani, A., & Pordel, N. (2026). Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Mineral Nutrient Uptake in Persian (Quercus brantii L.) Seedlings under Drought Stress., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2),393-407. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407302.670063
© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407302.670063

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Drought is one of the most critical abiotic stresses affecting plant growth, nutrient uptake, and seedling quality. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) have emerged as an effective biological strategy to enhance nutrient uptake, stress tolerance, and structural quality of seedlings. This study aimed to evaluate the effect of seed inoculation with selected native PGPR strains on mineral nutrient uptake and the Dickson Quality Index (DQI) of Iranian oak (*Quercus brantii* L.) seedlings under water deficit conditions and sustainable nursery management. The results can contribute to producing more resilient seedlings in nurseries and ensuring successful establishment in natural habitats.

Materials and Methods:

The greenhouse experiment involved Iranian oak seedlings subjected to three levels of water deficit: 80% (control), 60% (mild stress), and 40% (severe stress) of field capacity. Bacterial treatments included Bacillus anthracis St2 (B1), B. licheniformis Sk2 (B2), Stenotrophomonas maltophilia Bs1 (B3), B. cereus St3 (B4), a mixture of selected strains (BMix), and a non-inoculated control (B0). Bacterial inocula were grown in NB medium, incubated for 72 h at 28°C, and standardized to 5×10^9 CFU/ml. Bacterial isolates were collected from rhizosphere and non-rhizosphere soils of oak, Daphne mucronata, and drought-tolerant species Calligonum comosum and Calotropis procera. Screening of isolates was based on drought tolerance, ACC-deaminase activity, IAA production, phosphate solubilization, and HCN production, leading to the selection of four superior strains identified via 16S rRNA gene sequencing. A two-factor factorial completely randomized design with five replications was applied. Seeds were disinfected, germinated, and planted in pots. Each seedling received 5 mL of bacterial suspension, and irrigation was applied daily according to field capacity. After six months, aerial parts were harvested, dried, and analyzed for P, K, Na, Ca, and Mg concentrations. K/Na ratio and DQI were calculated. Data were tested for normality and homogeneity, and two-way ANOVA with Duncan's test at 5% probability was used to determine the effects of bacterial inoculation, drought stress, and their interactions.

Results :

Bacterial treatments, drought levels, and their interactions significantly affected seedling quality and mineral content. Increasing drought stress reduced P, Na, Ca, Mg, and DQI, whereas K and K/Na ratio increased. PGPR inoculation enhanced nutrient uptake, ionic balance, and DQI. The most pronounced effects were observed in the BMix treatment and strains B2 and B4. Specifically, B. cereus and B. licheniformis increased K, Ca, and Mg concentrations and improved tissue turgor and photosynthesis. Correlation analysis showed a significant positive association between DQI and Ca ($r=0.295$, $p<0.001$), highlighting the critical role of calcium in structural stability of seedlings.

Conclusion:

PGPR application is an effective biological strategy for enhancing nutritional efficiency, structural quality, and drought resilience of seedlings. This approach can be integrated into forest restoration programs and sustainable natural resource management to produce high-quality seedlings and support their successful establishment in natural environments

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

M.K., M. H and H.A.; methodology, H.A.; software, M.H. and M.K.; validation, H.A., A.M. and M.K.; formal analysis, M.K.; investigation, M.H and N.P. ; resources, M.K.; data curation, M.K. and H.A.; writing—original draft preparation, M.H., M.K., H.A. and N.P; writing—review and editing, M.H.; visualization, H.A.; supervision, M.H. and M.H.; project administration, M.H.; funding acquisition, M.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript." All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The Authors didn't use AI assisted technologies in this paper.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank Ilam University and Tehran University providing equipments and Facilities.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۲ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) بر جذب عناصر معدنی در نونهال‌های بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) تحت تنش کم‌آبی

مهری خسروی[۱] | مهدی حیدری[۲]✉ | حسینعلی علیخانی[۳] | اصغر مصلح آرانی[۴] | نرگس پردل[۵]

۱. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام. ایران. رایانامه:khosravimehri@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام. ایران. (نویسنده مسئول: m.heidari@ilam.ac.ir)

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج. ایران. رایانامه: halikhan@ut.ac.ir

۴. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد. ایران. رایانامه:amosleh@yazd.ac.ir

۵. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام. ایران. رایانامه:nargess.po@gmail.com

https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407302.670063

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۳
تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:
باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR)،
بلوط ایرانی،
تنش خشکی،
شاخص کیفیت،
نهال عناصر معدنی

چکیده

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده است که رشد، عملکرد و تعادل عناصر غذایی گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و کیفیت نهال‌ها را کاهش می‌دهد. هدف این پژوهش بررسی اثر تلقیح بذر با سویه‌های منتخب باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR)جداسازی‌شده از گونه‌های بومی بر جذب عناصر معدنی و شاخص کیفیت نونهال‌های بلوط ایرانی (Quercus brantii L.)تحت شرایط تنش کم‌آبی و مدیریت پایدار تولید نهال بود. آزمایش در سه سطح تنش کم‌آبی شامل ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ ظرفیت مزرعه و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد و اثر تلقیح با باکتریها بر جذب عناصر P، Ca، Mg، Na و K، نسبت K/Na، شاخص کیفیت نهال (Dickson Quality Index)و پاسخ‌های فیزیولوژیک نونهال‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش شدت تنش کم‌آبی موجب کاهش غلظت فسفر، کلسیم، منیزیم و سدیم و کاهش شاخص کیفیت نهال شد، در حالی که غلظت پتاسیم و نسبت K/Na افزایش یافت. تلقیح با باکتریها باعث افزایش جذب عناصر غذایی، حفظ تعادل یونی، بهبود شاخص کیفیت نهال و افزایش مقاومت نونهال‌ها در شرایط کم‌آبی شد؛ بویژه سویه‌های Bacillus cereus و Bacillus licheniformis موجب افزایش پتاسیم، کلسیم و منیزیم و بهبود تورژسانس و فتوسنتز بافت‌ها شدند. همچنین همبستگی مثبت و معناداری بین شاخص کیفیت نهال و کلسیم مشاهده شد که نقش کلیدی این عنصر را در پایداری ساختاری نهال نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR)یک راهکار زیستی مؤثر برای افزایش کارایی تغذیه‌ای، بهبود کیفیت ساختاری و تولید نهال‌های مقاوم‌تر به تنش کم‌آبی بوده و می‌تواند در برنامه‌های احیای جنگل و توسعه پایدار منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: خسروی، مهری؛ حیدری، مهدی؛ علیخانی، حسینعلی؛ مصلح آرانی، اصغر؛ و پردل، نرگس (۱۴۰۵). تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) بر جذب عناصر معدنی در نونهال‌های بلوط ایرانی (Quercus brantii L.) تحت تنش کم‌آبی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۲)، ۳۹۳-۴۰۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407302.670063

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407302.670063

مقدمه

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده در سراسر جهان به‌شمار می‌آید که رشد، عملکرد و پایداری اکوسیستم‌های گیاهی را به‌شدت محدود می‌کند. در واقع، پراکنش طبیعی گیاهان در زیست‌بوم‌های مختلف تا حد زیادی تحت تأثیر دسترسی به آب قرار دارد و کمبود آن سبب بروز تغییرات گسترده در فیزیولوژی، فتوسنتز و تغذیه گیاهان می‌شود (Fischer et al., 2019; Bista et al., 2018). بر اساس گزارش‌های متعدد، خشکی پس از شوری دومین عامل کاهش رشد گیاهان است و اثر آن نه‌تنها به کمبود آب در دسترس، بلکه به اختلال در جذب عناصر غذایی و برهم خوردن تعادل یونی سلول‌ها نیز مربوط می‌شود (Gessler et al., 2017; Khan et al., 2023).

در شرایط تنش کم‌آبی، فرآیندهایی نظیر بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش سطح برگ، افت هدایت روزنه‌ای، کاهش سنتز کلروفیل و پروتئین، و در نهایت افت نرخ فتوسنتز در گیاهان مشاهده می‌شود (Fischer et al., 2019). این تغییرات فیزیولوژیکی منجر به اختلال در جذب و انتقال مواد غذایی، به‌ویژه عناصر ماکرو و میکرو می‌گردند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در اثر خشکی، غلظت عناصری چون فسفر (P)، کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) در اندام‌های هوایی کاهش یافته، در حالی که میزان سدیم (Na) افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت پتاسیم به سدیم (K/Na) به‌عنوان شاخصی از مقاومت به تنش، کاهش پیدا می‌کند (Huang et al., 2025). کاهش این نسبت نشان‌دهنده‌ی آسیب به تعادل یونی و کاهش کارایی تنظیم اسمزی در گیاهان است.

جنگل‌های زاگرس که حدود ۴۰ درصد از کل جنگل‌های ایران را تشکیل می‌دهند، از جمله زیست‌بوم‌های شکننده کشور به‌شمار می‌روند که در سال‌های اخیر به‌دلیل تغییرات اقلیمی، افزایش دما و کاهش بارندگی، به‌طور فزاینده‌ای تحت تنش خشکی قرار گرفته‌اند (Gessler et al., 2017). گونه‌ی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) به‌عنوان گونه‌ی غالب و شاخص این جنگل‌ها، نقشی اساسی در پایداری خاک، چرخه آب و حفظ تنوع زیستی دارد، اما زادآوری طبیعی و بقای آن به‌شدت تحت تأثیر کمبود آب و تغذیه‌ی ضعیف قرار گرفته است (Heydari et al., 2017). احیای رویشگاه‌های بلوط مستلزم تولید نهال‌هایی با کیفیت‌تر و مقاوم‌تر به تنش‌های محیطی و با کارایی بالاتر در جذب عناصر غذایی است که بتوانند استقرار مطلوب تری در عرصه‌های طبیعی داشته باشند.

در سال‌های اخیر، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) می‌تواند جذب عناصر غذایی و رشد نهال‌ها گونه‌های درختی را تحت شرایط تنش خشکی بهبود بخشد (Liu et al., 2019; Lotfi et al., 2022; Crespo-Barreiro et al., 2025). به‌عنوان مثال، Ahmad و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که تلقیح ریزوباکتری‌ها در گیاهان تحت کم‌آبی موجب افزایش جذب عناصر ماکرو، حفظ تعادل یونی و بهبود شاخص‌های رشد می‌شود. همچنین، Al-Turki و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که PGPRها از طریق تولید فیتوهورمون‌هایی مانند ایندول‌استیک‌اسید (IAA) و آنزیم ACC-دآمیناز، موجب افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی می‌شوند. Anbuganesan و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای روی گیاه کرچک (*Ricinus communis* L.) اثر PGPR و بیوچار بررسی شد. نتایج نشان داد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد باعث افزایش رشد، جذب عناصر غذایی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این گونه شده است. همچنین فعالیت آنزیم‌های خاک بهبود یافت و مقاومت گیاه در برابر استرس افزایش پیدا کرده است.

با وجود انجام مطالعات متعدد، هنوز اثر باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) استخراج شده از گونه‌های بومی و مکانیسم عملکرد آن‌ها بر جذب عناصر معدنی در نونهال‌های بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) تحت تنش کم‌آبی به خوبی بررسی نشده است.

PGPRها گروهی از میکروارگانیسم‌های سودمند خاک هستند که در ناحیه ریزوسفری گیاه مستقر شده و با سازوکارهای مختلف، رشد و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهند (Shaikh, & Sayyed, 2015; Kaushal & Wani, 2016). این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های مستقیم مانند تثبیت نیتروژن، افزایش قابلیت جذب فسفر، آهن و روی، و تولید فیتوهورمون‌ها، و همچنین مکانیسم‌های غیرمستقیم نظیر القای مقاومت سیستماتیک و کاهش اثرات اکسیداتیو خشکی، موجب بهبود رشد و تغذیه گیاهان می‌شوند (Ahmad et al., 2022; Etesami & Beattie, 2017).

تحقیقات اخیر نشان داده است که برخی از سویه‌های جنس‌های Bacillus و Stenotrophomonas توانایی قابل توجهی در افزایش کارایی استفاده از فسفر و بهبود تعادل یونی گیاه دارند. این باکتری‌ها با افزایش توسعه‌ی ریشه و ترشح مواد حل‌کننده فسفات، نه‌تنها جذب عناصر ضروری را تقویت می‌کنند بلکه از طریق افزایش نسبت K/Na، موجب حفظ پایداری غشایی و تنظیم اسمزی بهتر در گیاهان تحت تنش خشکی می‌شوند (Etesami & Beattie, 2017; Al-Turki et al., 2023).

با توجه به نقش حیاتی عناصر معدنی در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک و مقاومت به تنش‌های غیرزنده، شناخت تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه بر وضعیت تغذیه‌ای نونهال‌های بلوط ایرانی می‌تواند در توسعه راهکارهای احیای رویشگاه‌های خشک و نیمه‌خشک زاگرس مؤثر باشد. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر تلقیح بذر بلوط ایرانی با سویه‌های منتخب باکتری‌های محرک رشد گیاه

بر جذب عناصر معدنی (P، Ca، Mg، Na و K) و نسبت K/Na در نونهال‌های این گونه تحت سطوح مختلف آبیاری است. این مطالعه می‌تواند به درک بهتر سازوکارهای فیزیولوژیکی مرتبط با تحمل به خشکی و ارائه‌ی راهکارهای زیستی در جهت تولید نهال‌های مقاوم‌تر در نهالستان و استقرار مطلوب در عرصه‌های طبیعی کمک نماید.

مواد و روش‌ها

آزمایش در شرایط گلخانه‌ای بر روی نونهال‌های بلوط ایرانی انجام شد و گیاهان تحت سه سطح تنش کم‌آبی شامل ۸۰ (بدون تنش به‌عنوان تیمار شاهد)، ۶۰ (تنش ملایم) و ۴۰ درصد (تنش شدید) ظرفیت زراعی قرار گرفتند. تلقیح باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) شامل پنج تیمار باکتریایی *Bacillus* anthracis *St2* (B1)، *B. licheniformis Sk2* (B2)، *Stenotrophomonas maltophilia* *Bs1* (B3)، B. cereus *St3* (B4) و اختلاط سویه‌های منتخب (BMix) به همراه تیمار شاهد بدون باکتری (B0) انجام شد. زادمایه باکتری‌ها در محیط NB کشت داده شده و پس از ۷۲ ساعت انکوباسیون روی شیکر دورانی در ۲۸ درجه سانتی‌گراد، جمعیت باکتری‌ها به ۵×۱۰^{۹} CFU/ml استاندارد شد (Moreira et al., 2019). در این تحقیق ۱۰۰ جدایه باکتری جداسازی شده از نمونه‌های خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii* L.) (سالم و دچار خشکیدگی)، دافنه (*Daphne mucronata*) به عنوان گونه‌های مناطق شمالی استان ایلام با اقلیم نیمه خشک مدیترانه‌ای و دو گونه خشکی‌پسند اسکنبیل؛ *Calligonum comosum* و استبرق؛ *Calotropis procera* از شهرستان دهلران در جنوب استان ایلام به عنوان نماینده اقلیم گرم و خشک (از هر گونه ۲۰ جدایه) تهیه شد. غربالگری و انتخاب جدایه‌های برتر بر اساس آزمون تعیین میزان تحمل جدایه‌ها به سطوح مختلف تنش خشکی در محیط کشت نوترینت براث (NB) حاوی غلظت‌های مختلف ۶۰۰۰ PEG (پتانسیل‌های آبی صفر، ۵- ، ۱۰- و ۱۵- بار)، توانایی تولید آنزیم ACC- دآمیناز، توان تولید IAA، توان حل‌کنندگی فسفات معدنی نامحلول (تری کلسیم فسفات، TCP) و تولید سیانید هیدروژن (HCN) جدایه‌های ریزوسفری انجام گرفت و در نهایت چهار جدایه که بر اساس آزمون‌های PGPs و مقاومت به خشکی جزو برترین انواع PGPR بومی جداسازی شده از تمام خاک‌های مورد آزمایش بودند انتخاب شدند و شناسایی مولکولی به‌روش توالی‌یابی ژن رمزکننده 16S rRNA انجام شد (Awais et al., 2017) و در سایت NCBI ثبت گردید؛ که نتایج آزمون‌های انجام شده برای این جدایه‌ها در (جدول ۱) آورده شده است.

جدول ۱. توان تحمل به تنش کم‌آبی و برخی ویژگی‌های محرک رشد گیاهی جدایه‌های برتر

تیمار باکتری	نام علمی و شماره دسترسی باکتری‌ها در سایت NCBI	تحمل به کم-آبی (bar)	تولید آنزیم ACC-d	تولید HCN	تولید IAA (mg l^{-1})	حلالیت تری کلسیم‌فسفات
B1	*Bacillus anthracis* strain St2 (MW547514)	۰/۸۵۶	+	-	۱۷/۷۳	۱/۲۸۲
B2	*B. licheniformis* strain Sk2 (MW547525)	۰/۴۸۹	+	-	۱۱/۴۵	-
B3	*maltophilia Stenotrophomonas* Bs1 Strain (MW647657)	۰/۱۶	-	-	۲۵/۸۴	۱/۵۸
B4	*B. cereus* strain St3 (MW547529)	۰/۲۳	+	-	۴۲/۹۳	۱/۵۷

توانایی تولید: + و عدم تولید: -

طرح آزمایش فاکتوریل دو عاملی بر اساس طرح کاملاً تصادفی (CRD) با پنج تکرار اجرا شد و عوامل شامل سطوح تنش کم‌آبی و تیمارهای باکتریایی بودند. طبق طرح آزمایشی (۵ تکرار و ۶ تیمار و سه سطح تنش کم‌آبی) جمعاً ۹۰ گلدان مورد استفاده قرار گرفت. درون هر گلدان یک بذر جوانه‌دار شده کشت و طبق طرح آزمایشی، هر گلدان با پنج میلی‌لیتر از سوسپانسیون هر باکتری با جمعیت یکسان (۵ ×۱۰^{۹} CFU/ml) تلقیح شد (این کار در طول دوره طرح سه بار یعنی هر دو ماه یکبار انجام گرفت) و آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر در حد ۸۰ ٪ ظرفیت مزرعه به‌صورت وزنی و روزانه انجام شد. دو ماه پس از کشت بذرهای تلقیح یافته در گلدان و در حالت چندبرگی‌شدن تیمار تنش رطوبتی ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه نیز طبق طرح آزمایشی به صورت وزنی با استفاده از ترازوی دیجیتال اعمال شد و تا برداشت نهال‌ها (شش ماه) به‌صورت روزانه ادامه یافت (Zarik et al., 2016).

خاک مورد استفاده در این آزمایش از خاک طبیعی عرصه جنگل‌های بلوط ایرانی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شد. پس از هوا خشک کردن نمونه خاک و عبور از الک دو میلی‌متری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن شامل: بافت خاک، درصد رطوبت‌های

اشباع خاک (SP)، ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک (ECe)، ماده آلی، pH گل اشباع، نیتروژن کل، کربنات‌کلسیم و منیزیم معادل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شد (Sparks,1996) و نتایج آن در (جدول ۲) بیان شد.

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مورد استفاده در گلدان‌ها

بافت	pH	SP (%)	FC (%)	PWP (%)	EC (dS/m)	کربنات کلسیم (%)	کربنات منیزیم (%)	ماده آلی (%)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	فسفر (mg/kg)	پتاسیم (mg/kg)	جمعیت باکتری (CFU/g)
لوم رسی	۷/۹۸	۴۱/۶	۳۴	۱۳	۰/۸۸	۲۴/۵	۲۴/۵	۴/۰۵	۲/۳۵	۰/۳۶	۱/۲	۴۱۰	۱/۳۹×۱۰^{۳}

پس از شش ماه، اندام‌های هوایی نونهال‌ها جمع‌آوری و خشک شدند و غلظت عناصر تغذیه‌ای فسفر (P) با روش هضم خشک و سنجش رنگ‌سنجی مولیبدوانادات (Olsen and Summer, 1982)، پتاسیم (K) و سدیم (Na) با فلیم فتومتر پس از هضم خشک و کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) با روش کمپلکسومتری تعیین شد. نسبت K/Na نیز از تقسیم مقدار پتاسیم بر سدیم محاسبه گردید.

برای تعیین کیفیت نهال، شاخص کیفیت نهال بر اساس فرمول دیکسون و همکاران (Dickson et al., 1960) محاسبه شد. رابطه محاسبه SQI به صورت زیر است:

$$\text{شاخص کیفیت نهال} = \frac{\text{وزن خشک کل نهال (گرم)}}{\left\{\frac{\text{طول ساقه (سانتی‌متر)}}{\text{قطر یقه (میلی‌متر)}} + \frac{\text{وزن خشک ساقه (گرم)}}{\text{وزن خشک ریشه (گرم)}}\right\}}$$

تحلیل آماری

داده‌ها پس از بررسی نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و لون تحلیل شد. اثر اصلی و متقابل تیمارهای باکتریایی و تنش کم‌آبی بر عناصر معدنی با آنالیز واریانس دوطرفه (GLM) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ مورد ارزیابی قرار گرفت. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳,۰ (SPSS Inc.، شیکاگو، IL) و بررسی همبستگی در نرم‌افزار R (پکیج ggplot2، GGally) انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه‌واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح تیمارهای تنش کم‌آبی، تیمارهای باکتریایی و هم‌چنین اثر متقابل آن‌ها بر کیفیت نهال و مقدار غلظت عناصر غذایی موجود در تمامی نونهال‌های بلوط ایرانی مورد بررسی معنی‌دار بود (جدول ۱).

جدول ۳. تجزیه‌واریانس (میانگین مربعات) اثر اصلی و متقابل تیمارهای باکتری و تنش کم‌آبی بر کیفیت نهال و برخی عناصر تغذیه‌ای اندازه‌گیری شده در گونه بلوط ایرانی

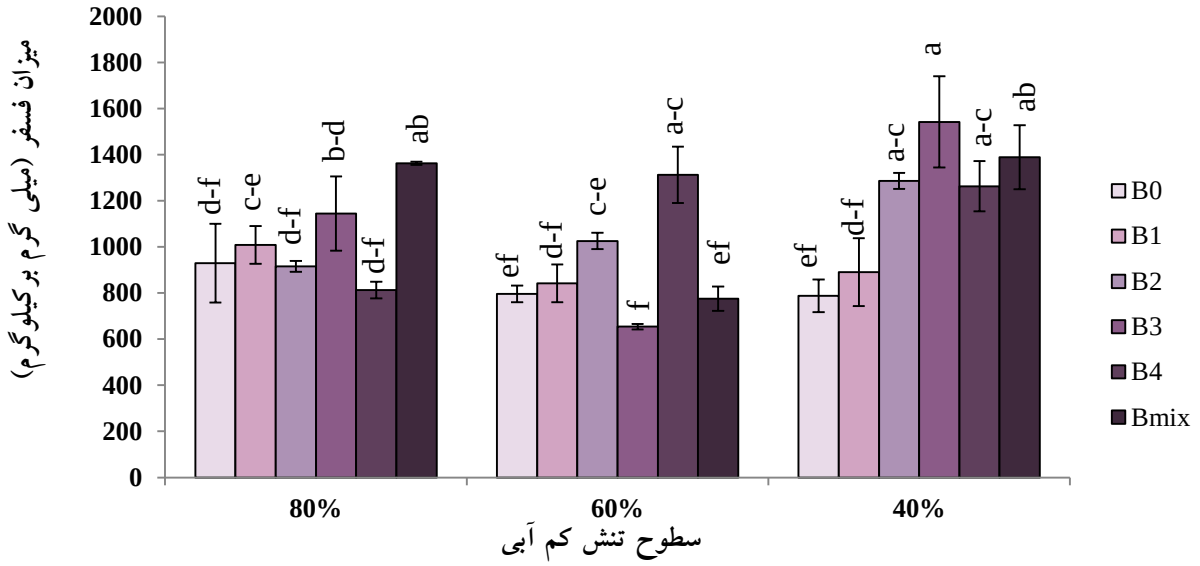
منابع تغییرات	درجه آزادی df	فسفر Phosphorus (p)	پتاسیم Potassium (K)	سدیم Sodium (Na)	نسبت پتاسیم به سدیم K/Na	کلسیم Calcium (Ca)	منیزیم Magnesium (Mg)	شاخص کیفیت نهال Dickson Quality Index
باکتری	۵	۱۶۱۸۶۸/۹۸۵**	۲۹۳۷۷۸۷/۶۴۷**	۵۸۱۸۱۷۳/۳**	۵/۰۲۱**	۵۰/۳۶۷**	۶۳/۲۶۷**	۰/۴۰۱*
تنش کم‌آبی	۲	۳۸۵۹۵۴/۸۵۸**	۶۰۱۵۹۳۰/۷۲۴**	۴۲۴۶۲۴/۴۷۵**	۳/۱۵**	۲۵۶/۷۹۲**	۳۲/۰۴۲*	۸/۷۳۹**
باکتری× تنش	۱۰	۱۸۹۱۹۰/۴۵۷**	۱۳۰۲۱۸۲/۷۸۲**	۴۱۵۷۰۷/۹۶۴**	۰/۹۴۱**	۲۷/۷۹۲**	۷۷/۲۹۲**	۱/۳۶۳**
خطا	۳۶	۳۱۴۴۴/۹۶۸	۲۵۰۱۸۸/۴۶۴	۴۸۵۲۷/۲۱۱	۰/۰۸۷	۲/۵۲۸	۱۴/۱۹۴	۰/۱۱۳
ضریب تغییرات (٪)	-	۳/۸۵	۵	۴/۷۳	۹	۳/۵۲	۵/۴	۴/۴

**و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد می‌باشد

مقدار فسفر

نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار فسفر در نونهال‌های بلوط کاهش یافت ولی این تفاوت‌ها در هر سه سطح تیمار تنش

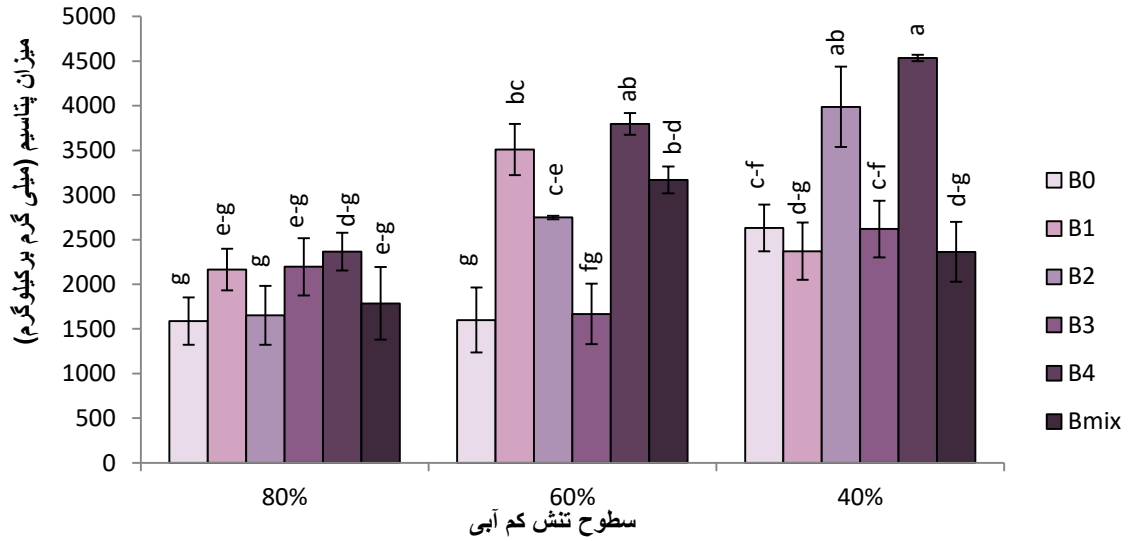
کم‌آبی (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه) با همدیگر از نظر آماری معنی‌دار نبود. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، فقط تیمار باکتری (BMix) باعث افزایش معنی‌دار ۴۶/۶۳ درصدی مقدار فسفر نسبت به تیمار شاهد شد، هم‌چنین تیمارهای (B1) و (B3) نیز باعث افزایش مقدار فسفر نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این تفاوت معنی‌دار نبود. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ فقط سویه باکتری (B4) باعث افزایش معنی‌دار ۶۴/۸۱ درصدی مقدار فسفر نسبت به تیمار شاهد شد، سایر تیمارهای باکتری اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار فسفر نسبت به تیمار شاهد شدند که بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B3) بود که باعث افزایش معنی‌دار ۹۵/۷۴ درصدی مقدار فسفر نسبت به تیمار شاهد شد، البته افزایش مقدار فسفر در سویه باکتری (B1) نسبت به شاهد معنی‌دار نبود (شکل ۱).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر جدایه‌های باکتری بر میزان فسفر نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی (B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، *Bacillus anthracis* St2 (B1)، *B. licheniformis* Sk2 (B2)، *Stenotrophomonas maltophilia* Bs1 (B3)، *B. cereus* (B4) و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقدار پتاسیم

نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار پتاسیم در نونهال‌های بلوط ایرانی افزایش یافت، به‌طوری‌که در تنش کم‌آبی ۴۰٪ مقدار پتاسیم به‌طور معنی‌داری ۶۵/۷۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ هم مقدار پتاسیم افزایش یافت ولی این تفاوت نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار پتاسیم در نونهال‌ها شدند ولی هیچ یک از این تفاوت‌ها نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار پتاسیم نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این افزایش مقدار پتاسیم در سویه باکتری (B3) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود و بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B4) بود که باعث افزایش معنی‌دار بیش از صد درصدی مقدار پتاسیم نسبت به تیمار شاهد شد. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ فقط تیمارهای (B2) و (B4) باعث افزایش معنی‌دار مقدار پتاسیم نسبت به تیمار شاهد شدند که بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B4) بود که باعث افزایش معنی‌دار ۷۲/۳۴ درصدی مقدار پتاسیم نسبت به تیمار شاهد شد ولی سایر تیمارهای باکتری اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند (شکل ۲).

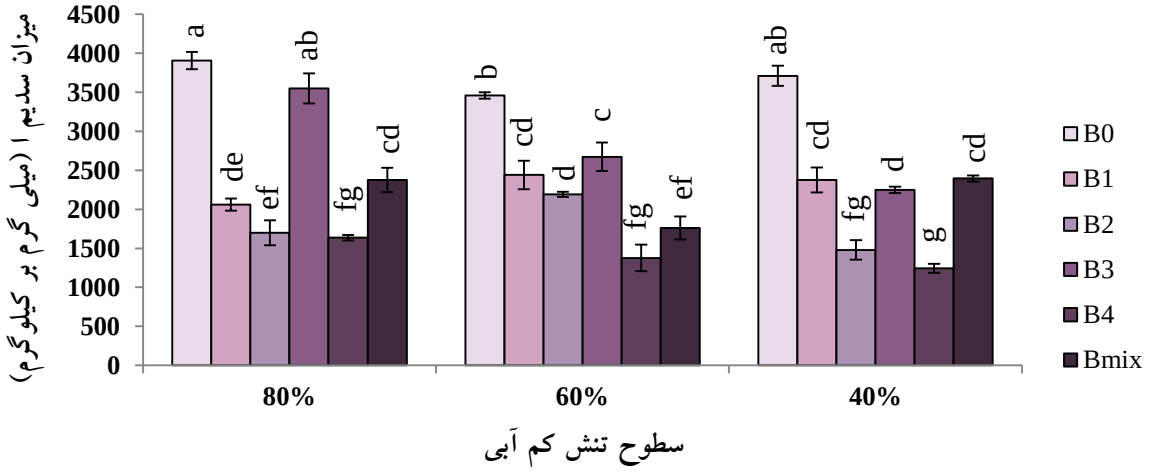


شکل ۲. مقایسه میانگین اثر سویه‌های باکتری بر میزان پتاسیم نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی

(B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، (B1) Bacillus anthracis St2، (B2) B. licheniformis Sk2، (B3) Stenotrophomonas maltophilia Bs1، (B4) B. cereus St3 و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقدار سدیم

نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار سدیم در نونهال‌های بلوط کاهش یافت، به‌طوری‌که در تنش کم‌آبی ۴۰٪ مقدار سدیم با سطح تنش کم‌آبی ۶۰٪ و تیمار ظرفیت مزرعه اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ مقدار سدیم به‌طور معنی‌داری ۱۱/۴۱ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، تمامی تیمارهای باکتری باعث کاهش مقدار سدیم نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این کاهش مقدار سدیم فقط در سویه باکتری (B3) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ هم نتایج مشابه تیمار ظرفیت مزرعه به‌دست آمد با این تفاوت که تمامی تیمارهای باکتری باعث کاهش معنی‌دار مقدار سدیم نسبت به تیمار شاهد شدند. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ هم نتایج دقیقاً مشابه تنش کم‌آبی ۶۰٪ به‌دست آمد یعنی تمامی تیمارهای باکتری باعث کاهش معنی‌دار مقدار سدیم نسبت به تیمار شاهد شدند (شکل ۳).

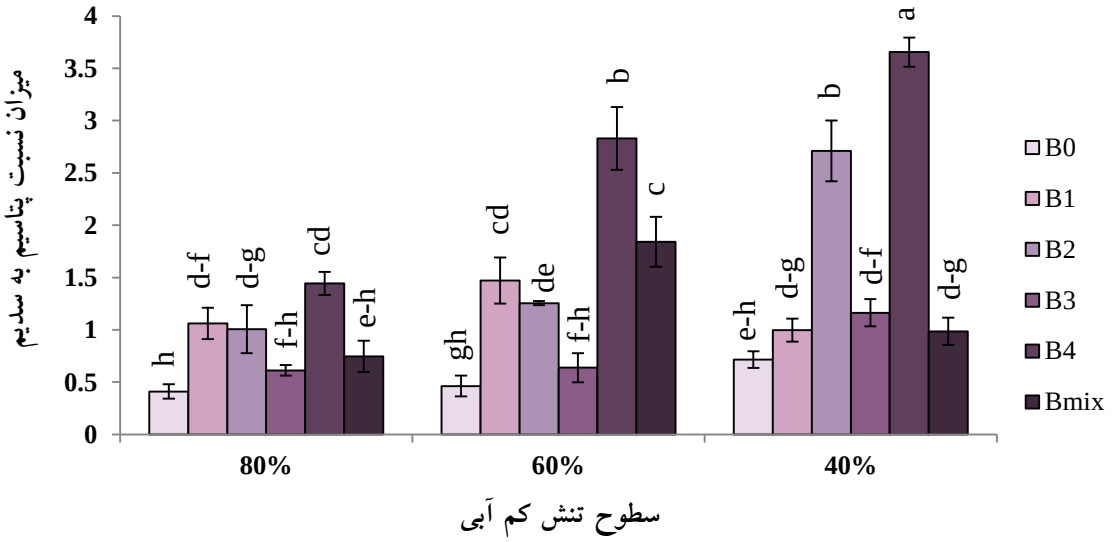


شکل ۳. مقایسه میانگین اثر جدایه‌های باکتری بر میزان سدیم نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی

(B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، (B1) Bacillus anthracis St2، (B2) B. licheniformis Sk2، (B3) Stenotrophomonas maltophilia Bs1، (B4) B. cereus St3 و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقدار نسبت پتاسیم به سدیم

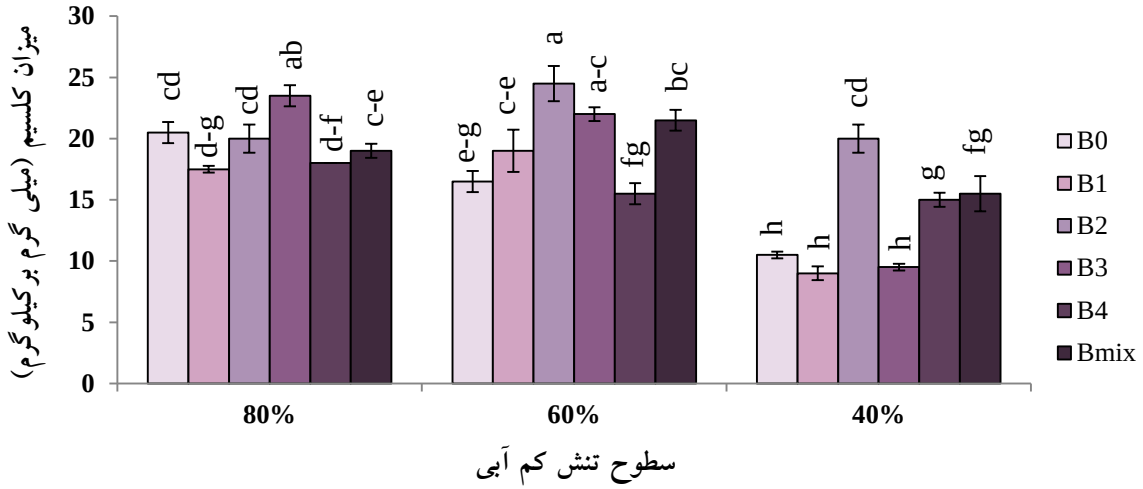
نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار نسبت پتاسیم به سدیم افزایش یافت ولی این تفاوت‌ها در هر سه سطح تیمار تنش کم‌آبی (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه) با همدیگر از نظر آماری معنی‌دار نبود. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار پتاسیم به سدیم نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این افزایش مقدار پتاسیم به سدیم در تیمارهای (B3) و (BMix) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود و بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B4) بود که باعث افزایش معنی‌دار بیش از صد درصدی مقدار پتاسیم به سدیم نسبت به تیمار شاهد شد. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ هم نتایج مشابه تیمار ظرفیت مزرعه به‌دست آمد با این تفاوت که افزایش مقدار پتاسیم به سدیم فقط در سویه باکتری (B3) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ نیز تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار پتاسیم به سدیم نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این افزایش مقدار پتاسیم فقط در تیمارهای (B2) و (B4) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود و بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B4) بود که باعث افزایش معنی‌دار بیش از صد درصدی مقدار پتاسیم به سدیم نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر سویه‌های باکتری بر میزان نسبت پتاسیم به سدیم نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی (B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، Bacillus anthracis St2 (B1)، B. licheniformis Sk2 (B2)، Stenotrophomonas maltophilia Bs1 (B3)، B. cereus (B4) St3 و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقدار کلسیم

نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار کلسیم در نونهال‌های بلوط کاهش یافت، به‌طوری‌که در تنش کم‌آبی ۴۰٪ مقدار کلسیم به‌طور معنی‌داری ۴۸/۷۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ هم مقدار کلسیم به‌طور معنی‌داری ۱۹/۵۱ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، فقط سویه باکتری (B3) باعث افزایش معنی‌دار ۱۶/۶۳ درصدی مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شد ولی سایر تیمارهای باکتری باعث کاهش مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شدند که این تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ تمامی تیمارهای باکتری (به استثنای سویه باکتری B4) باعث افزایش مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شدند که بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B2) بود که باعث افزایش معنی‌دار ۴۸/۴۸ درصدی مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شد، البته افزایش مقدار کلسیم در سویه باکتری (B1) و کاهش آن در سویه باکتری (B4) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ تیمارهای (B2)، (B4) و (BMix) باعث افزایش معنی‌دار مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شدند که بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B2) بود که باعث افزایش معنی‌دار ۹۰/۴۷ درصدی مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شد، هم‌چنین تیمارهای (B1) و (B3) باعث کاهش مقدار کلسیم نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این تفاوت‌ها معنی‌دار نبود (شکل ۵).

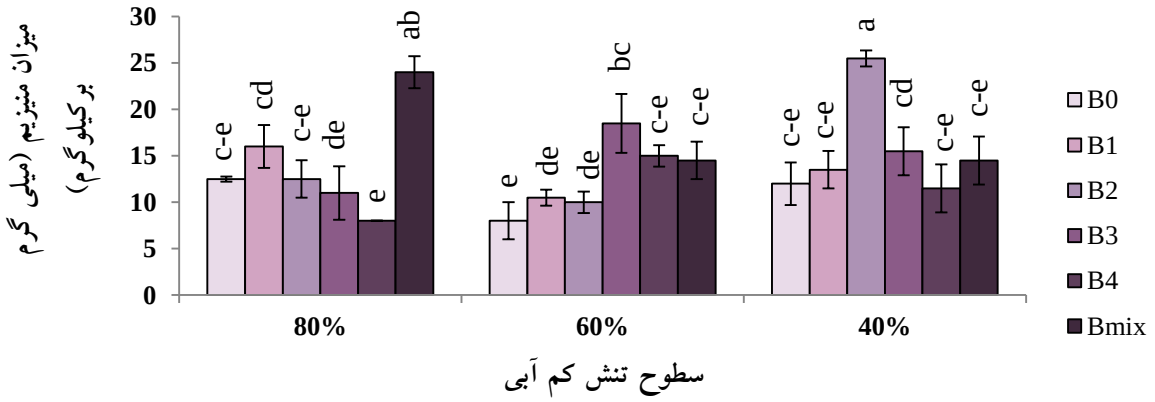


شکل ۵. مقایسه میانگین اثر سویه‌های باکتری بر میزان کلسیم نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی

(B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، (B1) Bacillus anthracis St2، (B2) B. licheniformis Sk2، (B3) Stenotrophomonas maltophilia Bs1، (B4) B. cereus St3 و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقدار منیزیم

نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار منیزیم در نونهال‌های بلوط کاهش یافت ولی این تفاوت‌ها در هر سه سطح تیمار تنش کم‌آبی (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه) با همدیگر از نظر آماری معنی‌دار نبود. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، فقط تیمار باکتری (BMix) باعث افزایش معنی‌دار ۹۲ درصدی مقدار منیزیم نسبت به تیمار شاهد شد، هم‌چنین سویه باکتری (B1) نیز باعث افزایش مقدار منیزیم نسبت به تیمار شاهد شد ولی این تفاوت معنی‌دار نبود، سایر تیمارهای باکتری باعث کاهش مقدار منیزیم نسبت به تیمار شاهد شدند که این تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌داری نبود. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار منیزیم نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این افزایش فقط در سویه باکتری (B3) معنی‌دار بود که باعث افزایش معنی‌دار بیش از صد درصدی مقدار منیزیم نسبت به تیمار شاهد شد. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ فقط سویه باکتری (B2) باعث افزایش معنی‌دار بیش از صد درصدی مقدار منیزیم نسبت به تیمار شاهد شد، سایر تیمارهای باکتری اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر سویه‌های باکتری بر میزان منیزیم نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی

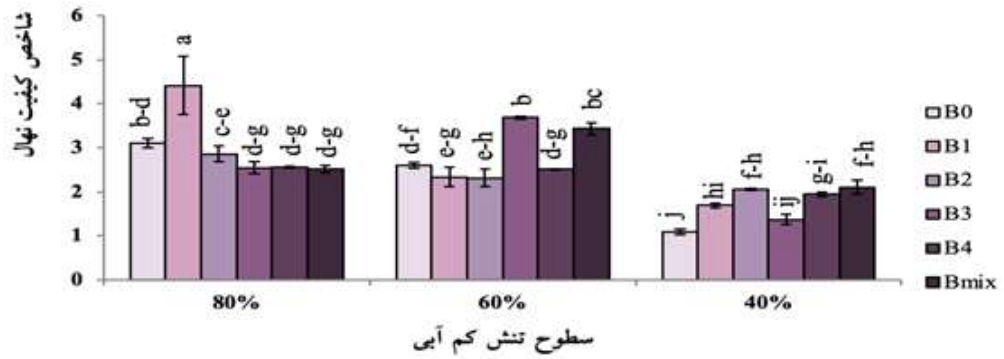
(B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، (B1) Bacillus anthracis St2، (B2) B. licheniformis Sk2، (B3) Stenotrophomonas maltophilia Bs1، (B4) B. cereus St3 و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقدار شاخص کیفیت نهال

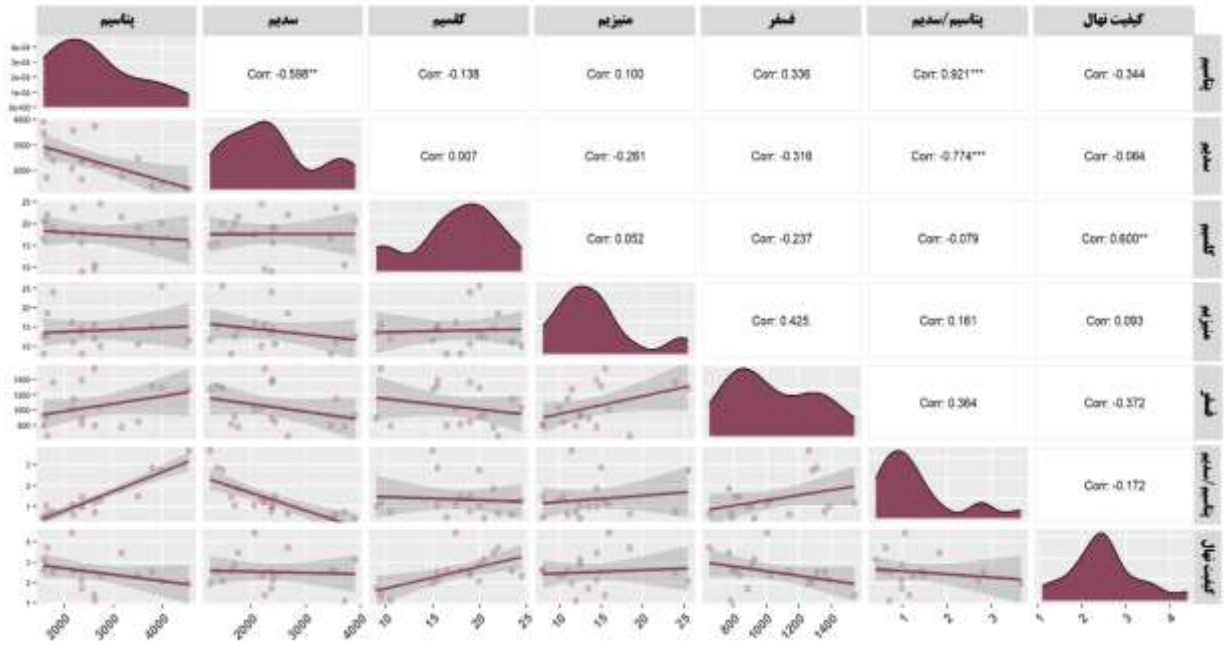
نتایج نشان داد که با افزایش تنش کم‌آبی مقدار شاخص کیفیت نونهال‌های بلوط کاهش یافت، به‌طوری‌که در تنش کم‌آبی ۴۰٪ مقدار

شاخص کیفیت نهال به‌طور معنی‌داری ۶۴/۸۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ هم مقدار شاخص کیفیت نهال کاهش یافت ولی این تفاوت نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در فاکتور تلقیح باکتریایی، در تیمار ظرفیت مزرعه، فقط سویه باکتری (B1) باعث افزایش معنی‌دار ۴۱/۹۳ درصدی مقدار شاخص کیفیت نهال نسبت به تیمار شاهد شد ولی سایر تیمارهای باکتری اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند. در تنش کم‌آبی ۶۰٪ فقط تیمارهای (B3) و (BMix) باعث افزایش معنی‌دار مقدار شاخص کیفیت نهال نسبت به تیمار شاهد شدند که بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به سویه باکتری (B3) بود که باعث افزایش معنی‌دار ۴۲ درصدی مقدار شاخص کیفیت نهال نسبت به تیمار شاهد شد ولی سایر تیمارهای باکتری اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند. در تنش کم‌آبی ۴۰٪ تمامی تیمارهای باکتری باعث افزایش مقدار شاخص کیفیت نهال نسبت به تیمار شاهد شدند ولی این افزایش مقدار شاخص کیفیت نهال در سویه باکتری (B3) نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود و بیش‌ترین مقدار این صفت مربوط به تیمار باکتری (BMix) بود که باعث افزایش معنی‌دار ۹۲/۶۶ درصدی مقدار شاخص کیفیت نهال نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۷).

میزان همبستگی کیفیت نهال و عناصر معدنی (پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، فسفر و پتاسیم/سدیم)در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که کیفیت نهال تنها با کلسیم ($r = ۰/۲۹۵$) همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد ($p < 0.001$).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر سویه‌های باکتری بر شاخص کیفیت نونهال‌های بلوط تحت سطوح مختلف تنش کم‌آبی (B0) تیمار بدون باکتری یا شاهد، (B1) Bacillus anthracis St2، (B2) B. licheniformis Sk2، (B3) Stenotrophomonas maltophilia Bs1، (B4) B. cereus St3 و (BMix) یا اختلاط سویه‌های منتخب. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار میان میانگین‌ها با آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.



شکل ۸. همبستگی کیفیت نهال و عناصر معدنی (پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، فسفر و پتاسیم/سدیم)
***، **، و *** به ترتیب معنی‌داری در سطوح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ را نشان می‌دهند.**

بحث

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش سطح تنش کم‌آبی، میزان فسفر، کلسیم، منیزیم و سدیم در اندام‌های هوایی نونهال‌های بلوط ایرانی کاهش یافت، در حالی که پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تنش خشکی نه تنها رشد گیاه را محدود می‌کند، بلکه تعادل عناصر غذایی را نیز دچار اختلال می‌نماید. حفظ تعادل عناصر غذایی برای گیاه حیاتی است، زیرا عناصری مانند فسفر، کلسیم و منیزیم نقش مهمی در کارایی مصرف آب، فرآیندهای آنزیمی و نگهداری ساختار سلول دارند و پتاسیم نیز به ویژه در تنظیم اسمزی و کنترل تلفات آب کاربرد دارد (Chandrasekaran et al., 2023). در تحقیق حاضر، کاهش جذب عناصر فسفر، کلسیم و منیزیم در شرایط تنش کم‌آبی توسط نونهال‌های بلوط ایرانی را می‌توان به کاهش حلالیت و قابل دسترس بودن عناصر، کاهش تعرق و رشد و توسعهٔ سیستم ریشه‌ای گیاه تحت شرایط کمبود رطوبت خاک نسبت داد زیرا این عناصر عمدتاً از طریق جریان آوند چوبی منتقل می‌شوند (Zheng et al., 2023). افزایش غلظت پتاسیم اندام هوایی در شرایط تنش آبی که توسط پژوهشگران زیادی گزارش شده است می‌تواند بیانگر نقش این عنصر در حفظ تورژسانس در شرایط تنش باشد. این عنصر در شرایط تنش در تنظیم فشار اسمزی و کنترل روزنه‌ای استفاده می‌شود تا بتواند از کاهش شدید پتانسیل آماس جلوگیری کند. تحت تنش خشکی، گیاه جهت افزایش مقاومت با مصرف انرژی غلظت پتاسیم را در ریشه و اندام هوایی بالا می‌برد که این افزایش تأثیر مثبتی را در فتوسنتز، افزایش رشد و از همه مهم‌تر جذب آب به‌دنبال دارد(Yuncai and Schmidhalter, 2005). افزایش نسبت K/Na به عنوان شاخص بهبود تعادل یونی تلقی می‌شود و تجمع پتاسیم می‌تواند مقاومت گیاه در شرایط تنش آب را افزایش دهد (Li et al., 2024). تلقیح با سویه‌های باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) نقش مهمی در بهبود جذب عناصر بویژه فسفر و پتاسیم داشت. این میکروارگانیسم‌ها با افزایش آزادسازی فسفات‌های غیرمحلول و فعال‌سازی آنزیم‌های فسفاتاز، جذب فسفر را به‌طور معنی‌دار افزایش می‌دهند (Benmrid et al., 2024). همچنین، PGPRها با تولید هورمون‌هایی نظیر ایندول‌استیک‌اسید (IAA)، ترشح اگزوپلی‌ساکاریدها و آنزیم ACC دآمیناز، توسعه ریشه، جریان مواد مغذی و کاهش ورود سدیم را بهبود می‌بخشند (El Saadony et al., 2024). در مورد پتاسیم، تلقیح با Bacillus cereus منجر به افزایش معنی‌دار پتاسیم جذب‌شده گردید و تورژسانس و فتوسنتز بافت‌ها تحت تنش کم‌آبی حفظ شد (Santander et al., 2024). کاهش نسبی سدیم در اندام‌های تلقیح‌شده نشان می‌دهد که باکتری‌ها می‌توانند تعادل پتاسیم/سدیم را تنظیم کرده و اثرات مضر سدیم را کاهش دهند (Khajeeyan et al., 2024). علاوه بر این، استفاده از سویه‌های باکتریایی مانند *Bacillus licheniformis* موجب افزایش جذب Ca و Mg شد که احتمالاً به توسعه سیستم ریشه‌ای، تولید IAA و آنزیم ACC-دآمیناز مرتبط است. این مکانیسم‌ها با سایر فعالیت‌های متابولیکی PGPR، از جمله تعادل یونی، القاء مقاومت سیستماتیک و تولید پلیمرهای برون‌سلولی، به تحمل گیاهان در برابر تنش‌های محیطی کمک می‌کنند. به‌طور کلی، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه، به ویژه در نهال‌های گونه‌های حساس مانند بلوط ایرانی، می‌تواند به‌عنوان راه‌کار زیستی مؤثری برای افزایش مقاومت به تنش کم‌آبی و بهبود جذب عناصر غذایی باشد. این نتیجه با مرورهای جامع اخیر نیز همسوست و نشان می‌دهد که PGPRها از طریق تنظیم جذب مواد مغذی، بهبود تعادل یونی، افزایش فعالیت آنزیمی و ترشح ترکیبات کمکی، کمک قابل‌توجهی به مقاومت گیاهان در برابر تنش آب می‌کنند (Khajeeyan et al., 2024). توصیه می‌شود در مطالعات آینده، اثرات میدانی این باکتری‌ها و مکانیسم مولکولی آنها در گیاهان هدف تحت تنش کم‌آبی به‌طور دقیق‌تر شناسایی گردد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش کم‌آبی، شاخص کیفیت نهال‌های بلوط به‌طور معنی‌داری کاهش یافت؛ به‌ویژه در تیمار تنش شدید (۴۰٪ ظرفیت میدانی) کاهش معنی‌دار دیده شد، در حالی که در تنش متوسط (۶۰٪ ظرفیت میدانی) کاهش غیرمعنی‌دار بود. کاهش شاخص کیفیت نهال تحت تنش کم‌آبی را می‌توان به مکانیسم‌هایی چون کاهش جذب آب و مواد غذایی، اختلال در فتوسنتز و کاهش سنتز کلروفیل، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تبادل گاز، و همچنین افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و آسیب اکسیداتیو نسبت داد (Chieb et al., 2023). از سوی دیگر، تلقیح باکتری‌های محرک رشد مانند Pseudomonas و Bacillus می‌تواند با افزایش تولید فیتوهورمون‌ها، افزایش جذب عناصر غذایی، بهبود سیستم ریشه و تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با استرس، تحمل گیاه به خشکی را تقویت کند. مکانیسم‌های مطرح شامل تولید اکسوپلی‌ساکارید، آنزیم ACC-deaminase، و فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی است (Chieb et al., 2023). این نتایج با مطالعات دیگر نیز هم‌خوانی دارد؛ مثلاً طراحی مجموعه‌های باکتریایی هم‌تراز با ویژگی‌های ریشه‌ای بلوط نشان داده است که تلقیح می‌تواند درصد نهال‌های دچار علائم خشکی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (Aleksieienko et al., 2025). نتایج نشان می‌دهد که همبستگی مثبت و معنادار بین شاخص کیفیت نهال و کلسیم وجود دارد. شاخص کیفیت نهال یک شاخص ترکیبی است که بر پایه عواملی مانند وزن خشک بخش هوایی، وزن خشک ریشه، ارتفاع، قطر ساقه و نسبت‌های میان آن‌ها محاسبه می‌شود و نمایانگر توانایی رشد، تعادل ساختاری و استقرار نهال پس از انتقال به محیط رشد نهایی است (Heydari

et al., 2025). در شرایط تنش خشکی، کلسیم نقش کلیدی در حفظ پایداری سلولی ایفا می‌کند؛ زیرا افزایش تنش معمولاً به آسیب غشایی و نشت یون‌ها منجر می‌شود، و کلسیم می‌تواند با استحکام‌بخشی به دیواره و غشای سلولی از این آسیب جلوگیری کند (Malyukova et al., 2022). نهال‌هایی که غلظت بالاتری از کلسیم را در بافت‌های خود حفظ کرده‌اند، دیواره‌های سلولی محکم‌تر، پایداری غشایی بیشتر و ساختار بافتی سالم‌تری دارند؛ بنابراین افزایش محتوای کلسیم می‌تواند بهبود در شاخص کیفیت نهال را توضیح دهد (Weng et al., 2022; Li et al., 2022).

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که تنش کم‌آبی باعث کاهش جذب عناصر مغذی کلیدی شامل فسفر، کلسیم، منیزیم و سدیم در اندام‌های هوایی نهال‌های بلوط ایرانی می‌شود، در حالی که میزان پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم افزایش می‌یابد. کاهش جذب Ca و Mg عمدتاً به دلیل محدودیت در تعرق و انتقال عناصر از ریشه به اندام‌های هوایی رخ می‌دهد، در حالی که افزایش نسبت K/Na می‌تواند مقاومت گیاه در شرایط خشکی را بهبود بخشد. تلقیح با سویه‌های باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) اثرات مثبتی بر جذب عناصر غذایی، حفظ تعادل یونی و افزایش شاخص کیفیت نهال داشت. این میکروارگانیسم‌ها با افزایش آزادسازی فسفات‌ها، تولید فیتوهورمون‌ها، ترشح اگزوپلی‌ساکاریدها و فعال‌سازی آنزیم ACC-deaminase، توسعه ریشه و جریان مواد مغذی را بهبود بخشیده و اثرات مضر سدیم را کاهش دادند. به‌طور خاص، تلقیح با Bacillus cereus و Bacillus licheniformis موجب افزایش جذب پتاسیم، کلسیم و منیزیم و حفظ تورژسانس و فتوسنتز بافت‌ها تحت تنش شد. به‌نظر می‌رسد در این تحقیق آن‌چه باعث ایجاد تفاوت در شاخص‌های رشد نونهال‌های بلوط ایرانی در تیمارهای مختلف جدایه‌ها شده است برآیند مجموعه‌ای از اثرات PGPs این باکتری‌ها و ترشح متابولیت‌های آن‌ها در حضور ریشه گیاه، در این خصوص می‌باشد. یعنی همان‌طوری که بیان شد (جدول ۱) جدایه‌های باکتری دارای توانمندی‌های متفاوتی از نظر خصوصیات محرک رشد گیاه بودند بنابراین اثرات متفاوتی بر روی نهال‌ها از خود نشان دادند. باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌توانند از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه، بهبود ساختمان فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگه‌داری آب، کاهش جذب سدیم و افزایش بیان ژن‌های مسئول ایجاد مقاومت در مقابل تنش کم‌آبی باعث افزایش تحمل گیاهان و درختان از جمله بلوط ایرانی به تنش‌های محیطی شوند (Bacili *et al*., 2004).

نتایج همچنین نشان داد که شاخص کیفیت نهال با شدت تنش کاهش می‌یابد؛ کاهش شاخص کیفیت در تنش شدید ۴۰٪ ظرفیت میدانی معنادار بود، در حالی که در تنش ۶۰٪ کاهش غیرمعنادار بود. کاهش کیفیت نهال تحت تنش خشکی به کاهش جذب آب و مواد مغذی، اختلال در فتوسنتز، کاهش سنتز کلروفیل، بسته شدن روزنه‌ها و افزایش آسیب اکسیداتیو مرتبط است. با این حال، تلقیح باکتری‌های محرک رشد مانند Pseudomonas و Bacillus توانست از طریق بهبود سیستم ریشه، افزایش جذب عناصر غذایی، تولید فیتوهورمون‌ها و فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی، تحمل گیاه به خشکی را افزایش دهد. در نهایت، همبستگی مثبت و معنادار بین شاخص کیفیت نهال و کلسیم نشان داد که این عنصر نقش کلیدی در پایداری سلولی و ساختار سالم نهال دارد. حفظ غلظت بالای کلسیم در بافت نهال موجب استحکام دیواره سلولی، پایداری غشایی و بهبود شاخص کیفیت نهال می‌شود. به طور کلی، استفاده از PGPR می‌تواند به عنوان یک راهکار زیستی مؤثر برای افزایش مقاومت نهال‌های بلوط ایرانی به تنش کم‌آبی و بهبود جذب عناصر غذایی توصیه شود. مطالعات آینده باید اثرات میدانی و مکانیسم‌های مولکولی این باکتری‌ها در شرایط طبیعی را دقیق‌تر بررسی کنند.

REFERENCES

Ahmad, H.M., Fiaz, S., Hafeez, S., Zahra, S., Shah, A.N., Gul, B., Aziz, O., Mahmood-Ur-Rahman, Fakhar, A., Rafique, M., Chen, Y., Yang, S.H., & Wang, X. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 875774. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.875774

Aleksieienko, I., Fernandes Hertel, M., Reilhan, J., de Castro, M., Légeret, B., Caixeta Oliveira, H., Reiter, I.M., & Santaella, C. (2025). Soil-gradient-derived bacterial synthetic communities enhance drought tolerance in Quercus pubescens and Sorbus domestica seedlings. *Plants*, 14(11), 1659. https://doi.org/10.3390/plants14111659

Al-Turki, A., Murali, M., Omar, A.F., Rehan, M., & Sayyed, R.Z. (2023). Recent advances in PGPR-mediated resilience toward interactive effects of drought and salt stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1214845. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214845

Anbuganesan, V., Vishnupradeep, R., Varshini, V.S., Archana, A.S., Soundarya, S., Bruno, L.B., & Rajkumar, M. (2022). Effect of plant growth-promoting rhizobacteria and biochar on Ricinus communis growth, physiology, nutrient uptake and soil enzyme activities. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 10, 640–651.

Awais, M., M. Tariqa, A. Ali, Q. Ali, A. Khan, B. Tabassum, I.A. Nasir and T. Husnain. (2017). Isolation, characterization

and inter-relationship of phosphate solubilizingbacteria from the rhizosphere of sugarcane and rice. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 11: 312-21.

Bacilio, M., Rodriguez, H., Moreno, M., Hernandez, J.P. and Bashan, Y., 2004. Mitigation of salt stress in wheat seedlings by a gfp-tagged *Azospirillum lipoferum*. *Biology and Fertility of Soils*, 40(3): 188-193.

Benmrid, B., Ghoulam, C., Ammar, I., Nkir, D., Saidi, R., Staropoli, A., Iacomino, G., Elhajjami, E., Cheto, S., Geistlinger, J., Idbella, M., & Bargaz, A. (2024). Drought-tolerant rhizobacteria with predicted functional traits enhanced wheat growth and P uptake under moderate drought and low P-availability. *Microbiological Research*, 277, 127795. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127795

Bista, D.R., Heckathorn, S.A., Jayawardena, D.M., Mishra, S., & Boldt, J.K. (2018). Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and -tolerant grasses. *Plants*, 7(2), 28. https://doi.org/10.3390/plants7020028

Chandrasekaran, U., Byeon, S., Kim, K., Huh, W., Han, A.R., & Lee, Y.-S. (2023). Influence of severe drought on mineral nutrient status in eastern white pine (Pinus strobus L.). *Journal of Forestry Research*, 34(1), 190–196. https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2220584

Chieb, M., & Gachomo, E.W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23, 407. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8

Crespo-Barreiro, A., Mazuecos-Aguilera, I., Anta-Fernández, F., Cara-Jiménez, J., & González-Andrés, F. (2025). Enhancing drought resistance in olive trees: understanding the synergistic effects of the combination of PGPR and biochar. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1–13.

Dickson, A., Leaf, A.L. & Hosner, J.F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10–13.

El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Mohammed, D.M., Fahmy, M.A., Elesawi, I.E., Ahmed, A.E., Algopishi, U.B., Elrys, A.S., Desoky, E.M., Mosa, W.F.A., Abd El-Mageed, T.A., Alhashmi, F.I., Mathew, B.T., AbuQamar, S.F., & El-Tarabily, K.A. (2024). Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria alleviate drought stress and enhance soil health for sustainable agriculture: A comprehensive review. Environmental and Experimental Botany, 209, 100632. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100632

Etesami, H. & Beattie, G.A. (2017). Plant–microbe interactions in adaptation of agricultural crops to abiotic stress conditions. In: Kumar, V., Kumar, M., Sharma, S., Prasad, R. (Eds.), Probiotics and Plant Health. *Springer Nature Singapore*, pp. 163–200. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2_7

Fischer, S., Hilger, T., Piepho, H.-P., Jordan, I., & Cadisch, G. (2019). Do we need more drought for better nutrition? The effect of precipitation on nutrient concentration in East African food crops. *Science of the Total Environment*, 658, 405–415. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.181

Gessler, A., Schaub, M., & McDowell, N.G. (2017). The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery. *New Phytologist*, 214(2), 513–520. https://doi.org/10.1111/nph.14340

Heydari, M., Anbari, M., Karamshahi, A., Hajinia, S., Valkó, O., & Prévosto, B. (2025). Enhancing *Cercis siliquastrum* seedling quality to meet ecological challenges in afforestation: influence of the combined effects of light, water stress, and zeolite amendment. *Trees*, 39(3), 44.

Heydari, M., Prévosto, B., Abdi, T., Mirzaei, J., Mirab-Balou, M., Rostami, N., Khosravi, M., & Pothier, D. (2017). Establishment of oak seedlings in historically disturbed sites: Regeneration success as a function of stand structure and soil characteristics. *Ecological Engineering*, 107, 172–182.

Huang, C., Zhai, S., Xu, Y., Huang, W., Duan, H., Wu, T., Liu, J., & Li, Z. (2025). Effects of drought on chemical elements and stoichiometry linked to plant species in subtropical forests. *Plant Growth Regulation*, 105(5), 1711–1722. https://doi.org/10.1007/s10725-025-01360-0

Kaushal, M., & Wani, S.P. (2016). Plant-growth-promoting rhizobacteria: Drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands. *Annals of Microbiology*, 66(1), 35–42. https://doi.org/10.1007/s13213-015-1055-2

Khajeeyan, R., Salehi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Hamidian, M., & Hazrati, S. (2024). Evaluation of the benefits of plant growth-promoting rhizobacteria and mycorrhizal fungi on biochemical and morphophysiological traits of Aloe barbadensis Mill under water deficit stress. *Scientific Reports*, 14, 14480. https://doi.org/10.1038/s41598-024-14480-0

Khan, M.I.R., Nazir, F., Maheshwari, C., Chopra, P., Chhillar, H., & Sreenivasulu, N. (2023). Mineral nutrients in plants under changing environments: A road to future food and nutrition security. *The Plant Genome*, 16(2), e20362. https://doi.org/10.1002/tpg2.20362

Li, H., Li, X., Zhang, G., Weng, X., Huang, S., Zhou, Y., Zhang, S., Liu, L., & Pei, J. (2022). The optimum calcium concentration for seedling growth of Mongolian pine (Pinus sylvestris var. Mongolica) under different soil types in northern semi-arid areas of China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 923543.

Li, W., Wang, H., Lv, G., Wang, J., & Li, J. (2024). Regulation of drought stress on nutrient cycle and metabolism of rhizosphere microorganisms in desert riparian forest. *Science of The Total Environment*, 954, 176148. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176148

Liu, F., Ma, H., Peng, L., Du, Z., Ma, B., & Liu, X. (2019). Effect of the inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on the photosynthetic characteristics of Sambucus williamsii Hance container seedlings under drought stress. *AMB Express*, 9(1), 169.

Lotfi, N., Soleimani, A., Çakmakçı, R., Vahdati, K., & Mohammadi, P. (2022). Characterization of plant growth-

promoting rhizobacteria (PGPR) in Persian walnut associated with drought stress tolerance. *Scientific Reports*, 12(1), 12725.

Malyukova, L.S., Koninskaya, N.G., Orlov, Y.L., & Samarina, L.S. (2022). Effects of exogenous calcium on the drought response of the tea plant (Camellia sinensis (L.) Kuntze). *PeerJ*, 10, e13997.

Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In: Page, A.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties. *American Society of Agronomy, Soil Science Society of America*, pp. 403–430.

Santander, C., González, F., Pérez, U., Ruiz, A., Aroca, R., Santos, C., Cornejo, P., & Vidal, G. (2024). Enhancing water status and nutrient uptake in drought-stressed lettuce plants (Lactuca sativa L.) via inoculation with different Bacillus spp. isolated from the Atacama Desert. *Plants*, 13(2), 158. https://doi.org/10.3390/plants13020158

Shaikh, S.S., & Sayyed, R. (2015). Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their formulation in biocontrol of plant diseases. In: Arora, N.K. (Ed.), Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets. *Springer India*, pp. 337–352. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2068-8_18

Sparks, D.L. (1996). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. SSSA, Madison, WI., USA.

Weng, X., Li, H., Ren, C., Zhou, Y., Zhu, W., Zhang, S., & Liu, L. (2022). Calcium regulates growth and nutrient absorption in poplar seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 13, 887098.

Yuncai, H. and Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4): 541-549.

Zarik, L., Meddich, A., Hijri, M., Hafidi, M., Ouhammou, A., Ouahmane, L., Duponnois, R., & Boumezzough, A. (2016). Use of arbuscular mycorrhizal fungi to improve the drought tolerance of Cupressus atlantica G. *Comptes Rendus Biologies*, 339, 185–196. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2016.04.009

Zheng, C., Bochmann, H., Liu, Z., Kant, J., Schrey, S.D., Wojciechowski, T., & Postma, J.A. (2023). Plant root plasticity during drought and recovery: What do we know and where to go? *Frontiers in Plant Science*, 14, 1084355. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1084355